LA TEORIA DE LA COMPUTACION EN LA ENCRUCIJADA DE LAS TEORIAS DE AUTOMATAS Y DE LA INFORMACION

Por F. SAEZ VACAS

Doctor Ingeniero de Telecomunicación. Maître ès-Sciences Aéronautiques. Ingeniero en Bull-General Electric.

Este artículo de síntesis es la transposición de los dos primeros puntos de nuestra (1) memoria de solicitud para la obtención de una de las becas del Fondo IBM del Centro de Cálculo de la Universidad de Madrid en su primera convocatoria (noviembre de 1968). El artículo representa un punto de vista personal sobre relaciones poco conocidas o discutidas entre diferentes aspectos de las teorías de los sistemas cibernéticos.

Un año después (diciembre de 1969) el fruto de nuestro trabajo ha sido recogido en una extensa memoria donde, junto a una presentación de origen bibliográfico de la teoría de códigos lineales desde un ángulo matemático y en especial de los códigos cíclicos, se publica un conjunto de resultados originales en el campo de la detección y corrección de errores.

La razón que nos mueve a extractar este artículo es que, por un lado, la correlación entre las memorias de solicitud y final no es muy grande, y por otro, que la parte de la primera que aquí publicamos es suficientemente general para que pueda ser considerada independiente de ambas y con interés propio.

I.—LA TEORIA DE AUTOMATAS A TRAVES DE SUS IMPLICACIONES.

Un autómata finito determinista se define como un quíntuple.

$$M = (I, 0, Q, \lambda, \delta) \text{ donde}$$

I conjunto finito de entradas
O » » de salidas.
Q » » de estados.

$\lambda : Q \times I \rightarrow Q$: función de transición o de estado.
$\delta : Q \times I \rightarrow O$: función de salida inmediata.

Este quíntuple formaliza el comportamiento de una máquina que, si en el instante t está en el estado $q(q \in Q)$ y recibe la entrada $i(i \in I)$, se encontrará en el instante $(t + 1)$ en el estado $\lambda(q, i)$ y emitirá la salida $\delta(q, i)$.

---

(1) El trabajo al que se alude se debe a un grupo formado por el autor de este artículo y los señores J. M. Hernando Rábanos y B. Fontana Sanclus, ingenieros de Telecomunicación.

La teoría de autómatas ofrece un campo vastísimo de estudio e investigación. Sus implicaciones son de tipo matemático y de tipo técnico y tecnológico: matemáticamente es un modelo cuya riqueza reside en el hecho de que las funciones λ y δ pueden ser cualesquiera, lo que ha dado origen a una mutua influencia con el álgebra. Actualmente, se pueden definir tantos tipos de autómatas como propiedades particulares se establezcan de λ y δ.

Un autómata un poco particular es la máquina de Turing, que es un autómata provisto de una cinta imaginaria de longitud infinita, que se puede mover en ambos sentidos. Esta máquina tan abstracta ha ejercido enorme influencia pues representa un punto de vista en el estudio de la teoría, en relación con la existencia de procedimientos mecánicos para la resolución de problemas (teoría de algoritmos).

Otro autómata dotado de propiedad de control es el autómata a pila o *push-down*, trascendente en la realización de compiladores en la parte correspondiente a la detección de errores gramaticales.

Hablando de gramática no hay que olvidar que una teoría en pleno crecimiento, como la de lenguajes artificiales, ha nacido, nutre a, y se nutre de, la teoría de los autómatas. Un «acontecimiento» para un autómata es simplemente una colección de secuencias de entrada. Formalmente se dice que «un acontecimiento» es un subconjunto del conjunto de todas las secuencias de entrada I* (para un I finito). Sólo los llamados «acontecimientos» regulares presentan un interés en la teoría. Un conjunto de «acontecimientos» regulares es un conjunto de «acontecimientos» realizables o reconocibles. Para manejar estos conjuntos, Kleene, en su artículo clásico «Representation of events in nerve nets and finite automata» en Automata Studies, Shannon McCarthy, Princeton 1956, creó el lenguaje de las expresiones regulares. Ahora bien, los lenguajes artificiales son una generalización del lenguaje de las expresiones regulares, y esto está cuajando actualmente en una teoría de los lenguajes de programación.

De la influencia conjunta de la teoría de autómatas y del desarrollo de los calculadores digitales ha nacido, a nuestro juicio, la teoría moderna de control. En efecto, la trasposición y modificación de los conceptos más corrientes en la teoría de autómatas a espacios dotados de una métrica ha engendrado una importantísima y generalizada teoría llamada del espacio de estado, aplicable a sistemas multivariables. Por otra parte, la posibilidad de resolver en tiempos reducidos problemas matemáticos de gran envergadura, del tipo de búsqueda de un valor óptimo, por métodos iterativos no analíticos, ha acelerado la puesta a punto de algorítmos de investigación operativa (progr. lineal, no lineal y dinámica) y de análisis numérico de aplicación al control de procesos complejos.

De todo lo dicho se desprende la fecundidad generatriz de los autómatas en el terreno matemático y del cálculo automático.

En el plano tecnológico, los autómatas adoptan el apelativo de circuitos secuenciales que, cuando están definidos en un espacio binario, dan lugar a los circuitos digitales binarios que han conocido un rapidísimo recorrido, desde los circuitos a base de relés, definidos en el conocido trabajo de Shannon, pasando por válvulas de vacío, transistores, hasta circuitos integrados, por ahora. La implementación física de los autómatas y la evolución tecnológica han interactuado con la teoría matemática en una fecunda, continua y mutua revitalización. Un calculador digital es, visto a su más alto nivel, un autómata, con una enorme cantidad de estados posibles. Otra forma de verlo es como un conjunto de autómatas que se llaman recurrentemente unos a otros. Desde el punto de vista físico o «hardware» es un conjunto de circuitos combinatorios y secuenciales (circuitos lógicos).

Es muy importante también la mutua influencia de esta teoría con determinados aspectos fisiológicos de los modelos nerviosos. Se han realizado circuitos secuenciales que simulan redes de neuronas y varios de los trabajos clásicos en teoría de autómatas están inspirados en el estudio del sistema nervioso de los seres vivos (Kleene, McCulloch, Von Neumann, Löfgren).

Es indudable que este interés por los mecanismos cerebrales y nerviosos manifestado por los matemáticos e ingenieros que, colaborando con psicólogos, fisiólogos, antropólogos y sociólogos, en la creación de modelos matemáticos y físicos (ver prólogo del libro Cybernetics, Wiener, The M. I. T. Press 1961) para estudiar cuantitativamente muchos aspectos de tales mecanismos, ha contribuido poderosamente a profundizar en el conocimiento del aprendizaje y del reconocimiento de formas. Estos aspectos están repercutiendo rápidamente en la renovación de la pedagogía y en conexión con lo que se ha dicho más arriba sobre calculadoras, teoría de lenguajes de programación y avances tecnológicos, en una pedagogía mecánica adaptada a cada alumno y a cada hora y a cada lugar.

Por otra parte, es muy posible que todas estas investigaciones sobre reconocimiento de formas, aprendizaje y circuitos neuronales, que hace cosa de cinco años pertenecían a la más pura elucubración, representen el fundamento de alguna próxima generación de calculadoras, si hemos de creer a Kaufman que, en un reciente artículo nos habla de la aceptación lógica y de la aceptación global de la información.

Ya empiezan a aparecer con carácter de realidad aplicaciones en sistemas de control adaptativos gracias al espacio de estado y los algorítmos de optimización sobre procesos estocásticos. La orientación por referencia a un sistema de estrellas es una aplicación del reconocimiento de formas.

En suma, de todo lo anterior puede decirse que la teoría de autómatas constituye el germen unas veces y otras el catalizador de una serie de disciplinas relacionadas más o menos estrechamente con la ciencia de los computadores.

II.—LA TEORIA DE LA INFORMACION A TRAVES DE ALGUNAS DE SUS IMPLICACIONES.

La teoría de la información es actualmente una disciplina autónoma de raíz matemática y, como en el caso de los autómatas, de hondas repercusiones matemáticas y técnicas. Concretamente, su impacto en las comunicaciones ha sido revolucionario.

Desde que Shannon y otros definieron los conceptos fundamentales de cantidad de información, entropía, capacidad de canal, velocidad de transmisión, redundancia, etc., la mayoría de los equipos de transmisión y tratamiento de datos se han hecho más seguros, más rápidos, mejores. Las técnicas surgidas como aplicación de dicha teoría permiten recoger información allí donde aparentemente (desde el punto de vista de los equipos anteriores) sólo había ruido.

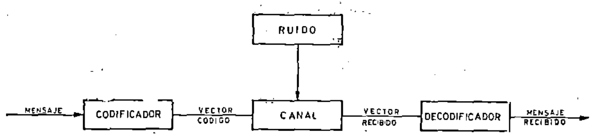
Si se quieren comprender los avances que acompañan a nuestro tiempo en toda clase de técnicas de comunicaciones y en los equipos de tratamiento de datos es necesario poseer una visión no desdeñable de la teoría de la información.

La teoría de la información y la de autómatas tienen muchos puntos comunes. Como exponente claro de lo que decimos está el nombre de Shannon que, con sus fundamentales trabajos «A symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits», Trans. AIEE, vol. 57, págs. 713-723, 1938, su edición de «Automata Studies», Princeton University Press 1956 y «The Mathematical Theory of Communications», Bell System Thec. Journal 1948, representa el genial punto de partida de ambas teorías, que, además, se acreditan un porcentaje muy elevado de responsabilidades en la creación de dos ciencias interdisciplinarias: Cibernética y Biónica.

Por no citar más que algún importante caso concreto en que ambas teorías se funden, hagamos referencia a los trabajos relativos a la síntesis de circuitos secuenciales redundantes o a los autómatas confiables con componentes no confiables, de clara inspiración fisiológica.

Antes de citar el más importante ejemplo, donde gran parte de las técnicas basadas en ambas teorías, se abrazan para la creación de un sistema complejísimo, veamos el esquema fundamental de un proceso de comunicación.

No entramos en la descripción de los modelos de fuente, canal y receptor, que son modelos estadísticos. Unicamente señalamos de pasada que los modelos de canal sin y con memoria son respectivamente equivalentes a lo que serían circuitos combinatorios y secuenciales probabilísticos.



Nos interesa destacar que la información está sometida a diversas transformaciones, la última de las cuales, antes de pasar al medio de transmisión o de almacenamiento (llamado canal), es una codificación. La codificación tiene uno de los dos objetivos siguientes o los dos a la vez.

Primero. Transformar la señal en otra (equivalente en cuanto a la cantidad de información) adecuada al soporte físico de la transmisión.

Segundo. Proteger la información en orden a minimizar la pérdida de la misma.

Un código es una correspondencia entre dos alfabetos $E = e_1, e_2, \ldots e_p \}$ de entrada y $S = \{ s_1, s_2, \ldots s_q \}$ de salida, donde $p \leq q$ en general. Una subclase importante en esta clase de problemas es aquella en que E y S son el mismo alfabeto: $GF(p)$ (G $F(p)$ es el cuerpo de los enteros módulo p, con p entero primo).

Considerado el esquema anterior en estas condiciones, el montaje consiste en una secuencia sobre $GF(p)$ de longitud fija l (se pueden transmitir p^l mensajes distintos). El codificador transforma el mensaje en una secuencia sobre $GF(p)$, la longitud m, llamada vector código, con $m \geqslant l$ en general. El vector código se transmite por el canal, cuya salida puede denominarse vector recibido. El ruido asociado al canal puede ser considerado como una secuencia independiente que se añade al vector código para constituir el vector recibido. El decodificador procesa el vector recibido y genera una secuencia que, con gran probabilidad (si el proceso es de «corrección de error») es idéntica al mensaje original. Otro tipo de proceso, llamado de «detección de error», no recupera el mensaje exacto pero permite una indicación de si el vector recibido es o no un vector código.

Caso particular muy importante es cuando $p = 2$ o alfabeto binario y la aplicación más extendida tiene lugar en los computadores digitales, con lo cual hemos llegado a la conclusión final de que, en casi todos sus aspectos de organización, los computadores son fruto de las teorías de autómatas y de la información: la información fluye dentro del calculador de muchas formas diferentes, es codificada, enviada, tratada y decodificada antes de que los resultados salgan al mundo exterior. Se necesita un alto grado de precisión y seguridad en este trasiego para no perder información. Las velocidades de los distintos órganos que componen el computador son muy diferentes y hay que ajustar la política de actuación global, de manera que los canales de transmisión trabajen de forma óptima, no haya interferencias y que los órganos más rápidos trabajen lo más independientemente posible de los lentos. Todos los circuitos y dispositivos que transforman la señal son circuitos secuenciales y la forma en que trabajan y se relacionan entre sí, viene determinada por alguno de los muchos apartados de la teoría de autómatas.

En lo que se refiere a los futuros computadores parece probable que éstos queden aún más marcados por los aspectos más evolucionados de dichas teorías.